

PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS PARA ENSAIOS DE ESFORÇOS CÍCLICOS EM PÁS DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

João Gilberto Astrada Chagas Filho- joao.filho@pucrs.br

Carlos Alexandre dos Santos, carlos.santos@pucrs.br

Gabriel da Silva Simioni, simioni@pucrs.br

Jorge Antonio Villar Alé, villar@pucrs.br

Centro de Energia Eólica (CE-EÓLICA), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul PUCRS Av. Ipiranga 6681 - Porto Alegre (RS) – Brasil - www.pucrs.br/ce-eolica

Resumo: O trabalho apresenta a metodologia proposta para ensaios de esforços cíclicos para aerogeradores de pequeno porte utilizando normas e procedimentos específicos encontrados em referencias bibliográficas. Para este objetivo foi desenvolvido uma bancada de testes. Em uma primeira etapa foi necessário idealizar e construir uma bancada na qual podem ser testadas pás de aerogeradores com comprimento de ate 2,7m. O equipamento permitirá realizar ensaios do tipo flexão por dispositivo mecânico de massa excêntrica. O mesmo é constituído por uma estrutura metálica em sua base e laterais, dando suporte aos demais componentes que são entre outros: motor elétrico, dispositivo de massa excêntrica ligado diretamente ao eixo do motor, barra de conexão, régua, barra de transmissão de tensões e inversor para avaliar. Tal bancada possui um sistema biela manivela que associado a uma régua controla a amplitude de flexão das pás e os parâmetros de excitação serão controlados pelo inversor de frequência interligada ao motor. Cabe assinalar que esta publicação pretende descrever os aspectos metodológicos já que o projeto esta em etapa de preparação de bancada para ensaios de fadiga e ensaios estáticos preliminares para determinação da magnitude de forças, sendo que num futuro próximo espera-se dar continuidade a novas publicações com resultados específicos da bancada em desenvolvimento.

Palavras-chave: aerogerador, materiais, ensaios, fadiga.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria eólica mundial os testes de fadiga realizados nas turbinas eólica de grande porte são considerados uma parte essencial no desenvolvimento de novas formas aerodinâmicas e estruturais de aerogeradores. As pás de turbinas eólicas estão sujeitas ao longo de sua vida útil a uma vasta gama de esforços os quais são complexos de ser reproduzidos com exatidão em qualquer experimento laboratorial. Conforme Epaarachchi, J. A. and Clausen, P. D. (2004) atualmente existem dois métodos para ensaio de fadiga em aerogeradores de grande porte: um por meio do uso de dispositivo de massa excêntrica e outro com o uso de atuadores hidráulicos solicitando as pás a serem testados próximos a sua frequência natural de vibração. A Tab.(1) mostra as vantagens e desvantagens relativas aos dois métodos. O método que utiliza atuadores hidráulicos permite obter resultados dos esforços de fadiga de forma mais realística aumentando o número de atuadores. Cabe assinalar que tanto o dispositivo de massa excêntrica quanto sistemas por atuadores hidráulicos são aplicáveis para testes em aerogeradores.

Tabela 1. Comparação dos métodos para ensaio de fadiga de aerogeradores.

Parâmetro de teste.	Teste por dispositivo de massa excêntrica.	Teste por atuadores hidráulicos.
Velocidade de teste	Depende do deslocamento e frequência do volante	Depende do controle de deslocamento (tamanho do cilindro hidráulico)
Espectro	Amplitude constante. Flexão em uma única direção.	Varias seqüências de cargas em varias direções.
Distribuição da força longitudinal	Depende da distribuição da rigidez.	Aumenta a acurácia quanto maior o numero de atuadores
Custo do teste	Relativamente baixo	Pode aumentar bastante com o tamanho e o numero de atuadores.

Fonte: Epaarachchi, J. A (2002)

O método de ensaios utilizando atuadores hidráulicos é mais apropriado para testes de pás de grande porte, pois estes componentes requerem forças de flexão elevadas e baixa frequência. Já as turbinas eólicas consideradas de pequeno porte apresentam forças de flexão mais baixas e frequência mais alta, devida a maior velocidade de rotação e a frequência de vibração natural das pás serem maiores. O sistema com atuador hidráulico poderia ser construído para o teste de pás pequenas, contudo seria relativamente mais caro, tanto para construir quanto para operar. A Figura (1a) mostra um equipamento que utiliza o método de massa excêntrica e a Fig. (1b) mostra o método de ensaio com atuadores hidráulicos para teste de esforços cíclicos de pás de aerogeradores.



Fonte: www.riso.dk

(a) Teste com massa excêntrica

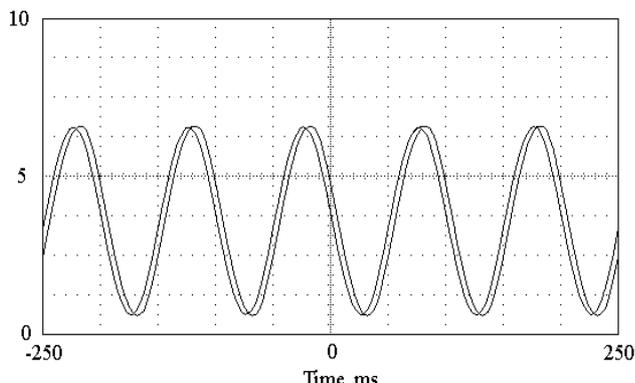


Fonte: www.nrel.gov

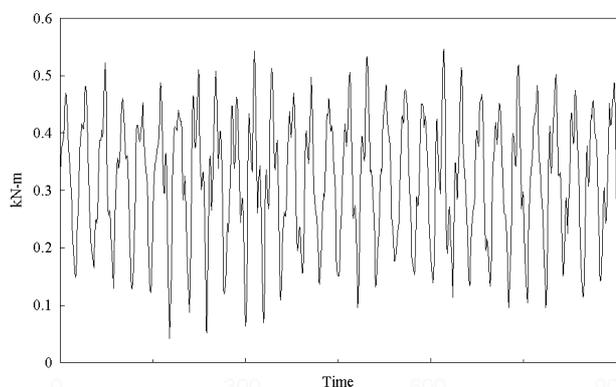
(b) Teste com atuador hidráulico

Figura 1. Equipamento de ensaios de esforços cíclicos

Estes dispositivos de ensaios de esforços cíclicos possuem a desvantagem de atuar em cada ciclo de flexão com deslocamento constante, enquanto que na operação normal de uma pá, cada ciclo de flexão é variável dependendo da variabilidade e turbulência do vento. A Fig. (2a) mostra um exemplo de ciclos de carga utilizado nos testes de amplitude constante na qual a faixa de ciclo é de 10 Hz com cargas entre 6,4kN e 0,64kN. A Fig. (2b) mostra um exemplo de carregamento com amplitude real de carga de pás de aerogeradores em campo. Esta distinção é importante quando a estrutura das pás entra em fadiga, isso porque ela estará flexionando um pouco abaixo do seu regime de carga. O desenvolvimento de ferramentas para prever o tempo de vida de materiais compósitos reforçados com fibra de vidro por algumas razões esta atrasada em relação aos metais sendo que uma delas é a própria natureza anisotrópica destes materiais (Wahl, Neil K., Mandell, John F. and Samborsky, Daniel D. (2001)). Enquanto os metais têm uma única métrica para a extensão da fratura, compósitos tem modos de falha mais complicados. A falha dos compósitos pode ocorrer por falha na matriz, delaminação, descolamento, arrancamento, fratura, flexão da fibra e falha de estrutura. Portanto uma destas falhas típicas pode envolver um complexo mecanismo de contribuição de alguns ou todos esses problemas citados.



(a) Cargas amplitude constante em laboratório



(a) Amplitude real de cargas em campo

Fonte: ((Wahl, Neil et Al. (2001)).

Figura 2. Exemplos de cargas em campo e laboratório

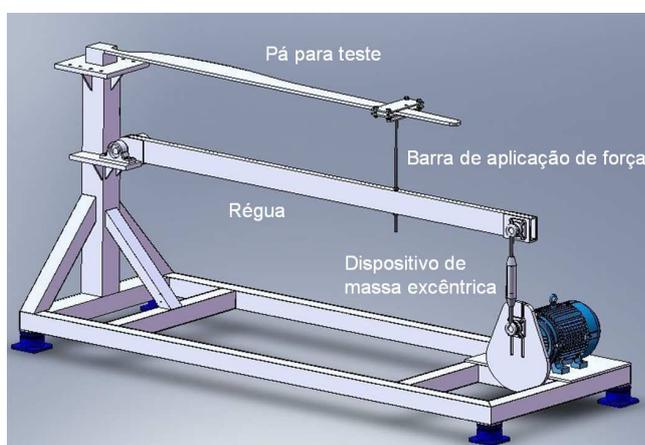
Embora os modelos propostos para determinar o tempo de vida sejam baseados em cada propriedade dos laminados que formam uma pá, muitos têm validade limitada. Os modelos mais complexos não parecem produzir resultados melhores do que a lei linear de acumulação de danos proposta por Miner (Wahl, Neil et Al. (2001)). Os

testes de amplitude constante e a regra de Miner não levam em conta a interação e efeitos da seqüência de carga, que podem ser importantes para os espectros que são de natureza aleatória (Fig. (2b)). Apesar das deficiências dessa lei, ela é utilizada na indústria eólica para estimar o tempo de vida dos materiais de aerogeradores. Testes de fadiga de laminados de fibra de vidro envolvem normalmente amplitude constante e carregamento sinusoidal de uma amostra até a falha.

A metodologia abordada utiliza como principal referencia o trabalho de Epaarachchi, J. A (2002) realizando as devidas adaptações e modificações que se adéqüem a escala e natureza das pás de aerogeradores de pequeno porte que desejam ser avaliadas. Tais pás são fabricadas em materiais compósitos reforçados com fibra de vidro em matriz polimérica com suas características físico químicas próprias e que devem ser avaliadas de forma conjunta com a forma e geometria das pás para obtenção de resultados mais próximos das condições reais de operação. Cabe assinalar que existe grande interesse dos fabricantes nacionais de contar com procedimentos e ensaios desta natureza dando maior confiabilidade aos projetos e a fabricação destas máquinas. Atualmente o mercado de pequenos aerogeradores se encontra em expansão no mundo; no caso do Brasil já existem fabricantes, contudo há uma carência de normas e procedimentos que auxiliem na busca da qualidade e confiabilidades dos aerogeradores nacionais. Espera-se que este trabalho, assim como os resultados obtidos, possa contribuir neste sentido.

2. PROJETO DA BANCADA DE TESTES

A metodologia de ensaios utiliza como referencia o trabalho de Epaarachchi Cluasen (2004). Foi desenvolvida uma bancada de testes para de ensaios de fadiga (Fig.(3)) que apresenta uma estrutura metálica na qual é fixada uma pá de aerogerador que pode ser submetida a esforços cíclicos. A bancada apresenta um dispositivo de massa excêntrica conectada a uma régua com controle da amplitude permitindo submeter à pá a esforços cíclicos. O deslocamento máximo de ensaio pode ser alterado mediante o ajuste do dispositivo de massa assimétrica. A régua ou barra horizontal é apoiada em suas extremidades por mancais. Sua função principal é transferir o movimento de giro vindo do motor transformado em movimento oscilatório pelo volante ligado a mesma através da biela. Além disto, a régua permite o ajuste do ponto de aplicação da carga na pá e também minimiza as vibrações vindas do motor e volante. A transmissão da força da régua para a pá é realizada pela respectiva barra de aplicação conforme ilustrado na Fig.(3). A bancada possibilita com facilidade adequar pás com diferentes comprimentos sendo originalmente projetada para pás de 2,7m. A estrutura é apoiada sobre amortecedores evitando transmissão de vibrações. A Figura (3a) mostra uma vista isométrica da bancada.



(a) Projeto da bancada



(b) Bancada de testes para ensaios de fadiga

Figura 3. Bancada de testes para ensaios de pás de aerogeradores de pequeno porte.

A Fig. (3b) mostra a estrutura metálica e demais componentes que integram o conjunto. A estrutura da base é de tubos de aço com secções quadradas utilizado nas laterais, viga da base e coluna. Após a construção da estrutura metálica iniciou a montagem dos componentes da bancada como: régua, motor, mancais, posicionamento de amostras para testes preliminares, elaboração de dispositivos de fixação e instalação de equipamentos de acompanhamento controle e medição de variáveis de testes.

3. PROCEDIMENTOS PARA TESTES CICLICOS DE PÁS

3.1. Desenvolvimento dos parâmetros para testes.

O principal objetivo nos procedimentos dos testes cíclicos é avaliar em bancada esforços para determinar finalmente a fadiga das pás. A fadiga é um fenômeno que origina uma redução progressiva da capacidade de operação do material quando submetido a um carregamento repetido. No caso das pás de aerogeradores trata-se de um carregamento cíclico. A fadiga se origina pela ação de tensões que variam no tempo menos não excedendo o limite elástico do material. Este carregamento provoca trincas e posteriormente a ruptura do material.

Um aerogerador é submetido no período de vida útil a um grande número de carregamentos dinâmicos produzidos pela rotação das pás assim como pela natureza turbulenta do vento sobre as pás. A Figura (4) mostra esquematicamente o sistema de coordenada das pás de um aerogerador assim como o carregamento provocado pelas forças do vento e um detalhe de uma das pás para análise de carregamento em bancada de teste.

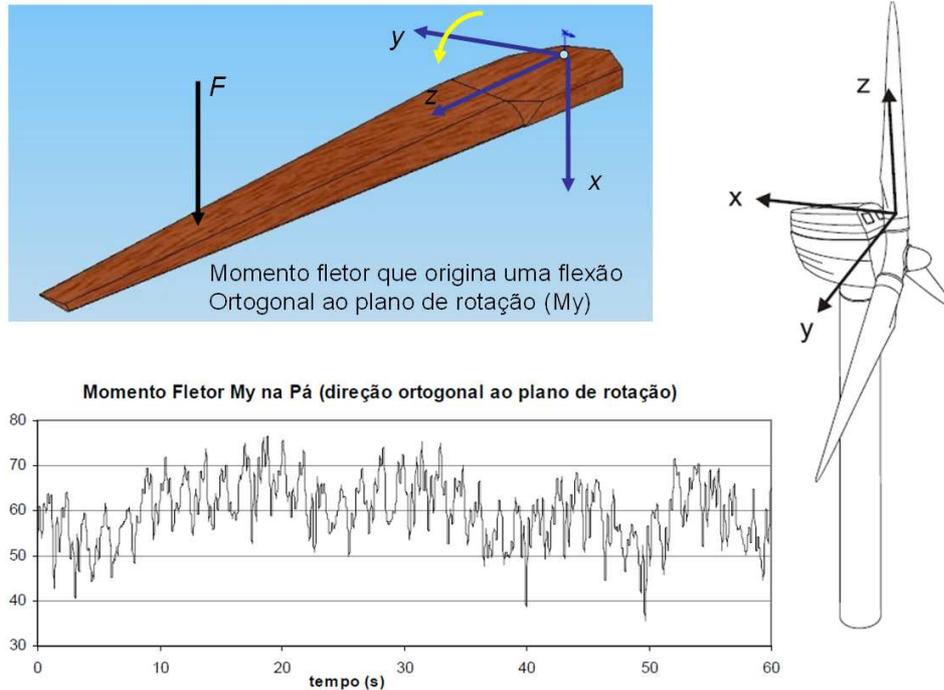


Figura 4. Representação de aerogerador e esforços por flexão.

Existem vários métodos utilizados para estudar e prever a fadiga de matérias, sendo que o denominado método de Wohler tem sido adotado para estudo de pás em aerogeradores. Este método estuda o comportamento de fadiga através de curvas S-N, que relaciona o histórico de tensões elásticas atuante na estrutura com o número de ciclos que o material suporta antes de falhar. Para quantificar o dano causado ao material por carregamento cíclico de diferentes amplitudes e diferentes valores médios é utilizada a regra de acúmulo linear denominada Palmgren-Miner. De acordo com esta regra o dano que a peça sofreu sob a ação de cada amplitude da tensão cíclica é diretamente proporcional ao número de ciclos em que atuou aquela amplitude de tensão. O dano provocado pela sollicitação cíclica será:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

Onde n_i é o numero de ciclos atuantes, para certa amplitude de tensão, e N_i é a vida que o material teria (em ciclos) quando submetido a um carregamento de certa amplitude, atuando isoladamente. O termo D_i seria o danos total causado pelas n_i repetições de um determinado carregamento R_{iram} . Segundo a regra de acumulo linear de Palmgren-Miner o critério de falha por fadiga, numa situação de acúmulo de dano, ocorrerá quando $D_{falha}=1$, onde isto é quando:

$$D_{falha} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = 1 \quad (2)$$

3.2. Descrição de metodologia para levantamento de cargas na bancada.

Descreve-se a seguir o método a ser adotado que utiliza como principal referência o trabalho de Epaarachchi, J. A (2002). A bancada de testes terá uma célula de carga localizada na barra de ligação entre a régua e a pá para leitura das respectivas cargas no ponto de aplicação de forças. A pá será instrumentada ao longo de sua extensão em locais pré definidos com extensômetros ao longo da amostra avaliada com intuito de medir a deformação. O dispositivo de ensaio permitirá aplicar uma carga cíclica sobre as pás para uma ampla gama de frequências e deslocamento. As tensões recebidas pelas pás de aerogeradores são causadas por forças aerodinâmicas e forças de inércia. Na presente trabalho espera-se reproduzir as mesmas por deslocamentos através de um ponto de aplicação de forças na bancada de ensaio. Este dispositivo induz na estrutura da pá somente cargas de flexão, no entanto o funcionamento real origina tanto esforços de flexão quanto esforços axiais. O sistema requer uma entrada de dados que permita ajustar os deslocamentos e frequências possíveis pelo dispositivo de ensaios. O sistema de aquisição de dados a ser utilizado apresentará duas partes principais: sensores colocados ao longo da pá em locais pré-selecionados chamados de extensômetros e equipamento de coleta, processamento e visualização de dados datalogger.

No trabalho de Epaarachchi, J. A (2002) os níveis de carga baseada na tensão do ponto mais crítico da pá são predeterminados e utilizados posteriormente nos ensaios com auxílio das cargas determinadas através de elementos finitos. No presente trabalho será avaliada qual a melhor metodologia que pode ser adotada para condicionar os esforços que serão submetidos à pá na bancada para determinar as condições de fadiga da mesma.

3.3. Ensaios de flexão estática

Foram realizados ensaios de flexão a três pontos em máquina EMIC PC 200 I para análise do comportamento do material das pás quando solicitado a esforços mecânicos (Fig.(6)). O ensaio consistiu na aplicação de uma carga P no centro do corpo-de-prova (retirado da pá), apoiado em dois pontos (ASTM E 855-90). A carga aplicada partiu de um valor inicial igual a zero e aumentou lentamente até a ruptura do corpo-de-prova. O valor da carga aplicada *versus* o deslocamento do ponto central consistiu na resposta do ensaio. Foi empregada uma velocidade de 0,02 mm/min para a aplicação da carga, sendo ensaiados dois corpos de prova em condições idênticas. A distância entre apoios foi de 142 mm e foi aplicada uma pré-carga de 150 N antes da realização do ensaio propriamente dito.

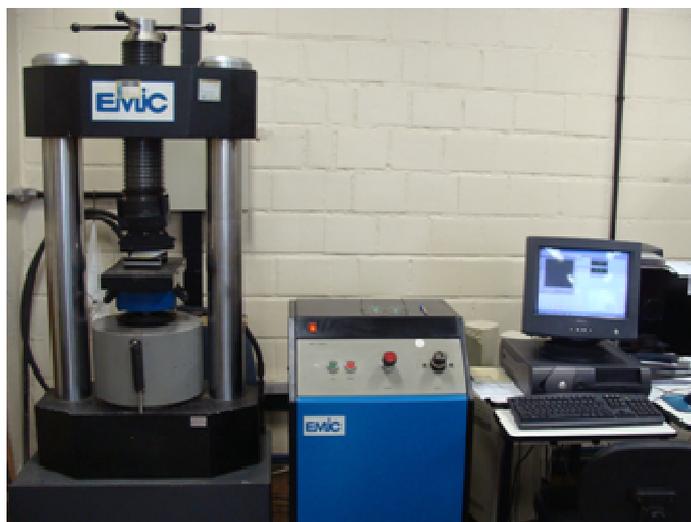


Figura 6. Máquina de ensaio universal empregada nos ensaios.

4. RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÕES

A Fig.(7) apresenta imagens obtidas durante a realização dos ensaios destacando os instantes de início de aplicação da carga (Fig. (7a)) e o momento da ruptura do corpo de prova (Fig. (7b)). Observaram-se fraturas primeiramente nas laterais seguida por fraturas na parte superior em contato com o punção. A Fig. (8) mostra um exemplo de resultado do ensaio onde pode se observar a aplicação da pré-carga, a região de comportamento elástico, a região de comportamento plástico e a posterior fratura. O valor médio para a força de escoamento foi de 1500 N e para a força de início da fratura de 1650 N. Os corpos de prova apresentaram um deslocamento total médio de 11 mm.

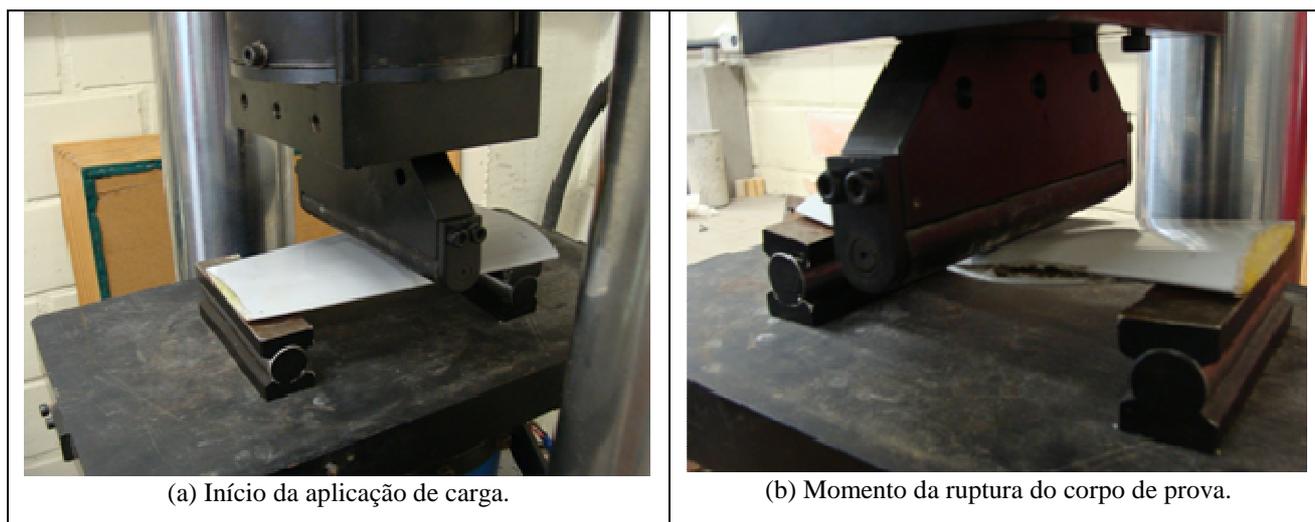


Figura 7. Imagens obtidas durante realização dos ensaios de flexão estática.

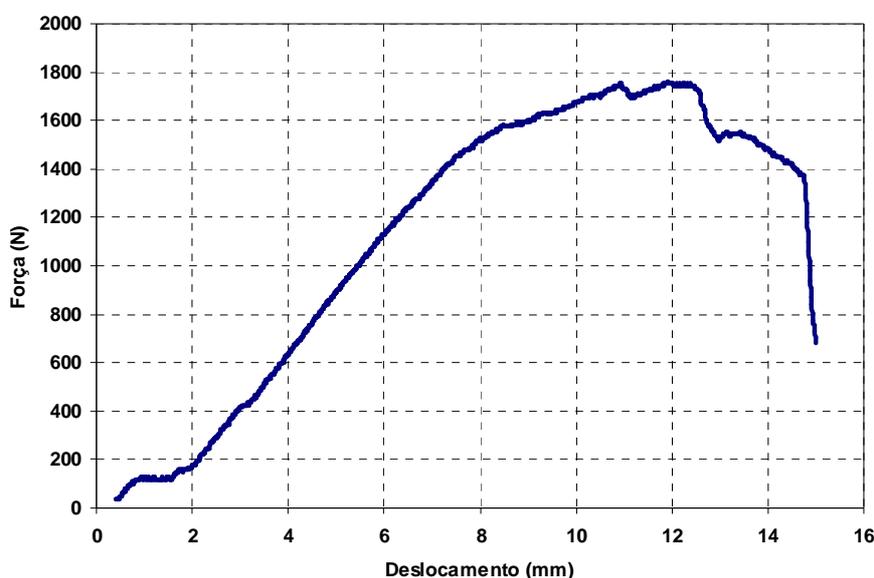


Figura 8. Resultado obtido a partir do ensaio de flexão em corpo de prova retirado da pá.

5. CONCLUSÕES

- A bancada projetada e construída encontra-se pronta para a realização dos ensaios de fadiga nas pás, inclusive com a instalação dos sensores de carga, deformação e controladores;
- Os resultados dos ensaios preliminares de flexão permitiram a determinação das forças de escoamento, de início da ruptura dos corpos de prova e os deslocamentos sofrido pelos mesmos;
- Estes valores serão empregados como parâmetros iniciais para estabelecimento das condições dos ensaios de fadiga.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM Standard E290-92- Standard Test Method for Semi-Guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials, 1982(1992).
- Epaarachchi, Jayantha A. and Clausen, Philip D. (2004-01-01). Accelerated Full Scale Fatigue Testing Of A Small Composite Wind Turbine Blade Using A Mechanically Operated Test Rig. In: Atrens, A., Boland, J. N., Clegg, R. and Griffiths, J. R. Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04), Brisbane, Australia, (111-117). 26-29 September 2004.

Epaarachchi, J. A (2002) The Development and Testing of a New Fatigue Life Procedure for Small Composite Wind Turbine Blades Incorporating New Empirical Fatigue Life Prediction and Damage Accumulation Models for Glass Fibre Reinforced Plastics", Ph.D. Thesis presented to the University of Newcastle, Australia

Hughes, S. Wind Turbine Testing at NREL. National Renewable Energy Laboratory (2008 Sandia Blade Workshop. Disponível em: < <http://www.sandia.gov/wind/2008BladeWorkshop/PDFs/Mon-13-Hughes.pdf>> . Acesso em: 01/09/2009.

Wahl, Neil K., Mandell, John F. and Samborsky, Daniel D., "Spectrum Fatigue Lifetime and Residual Strength for Fiberglass Laminates," Contractor Report (to be published). (2001)